

Investigation of dielectric parameters of beers in the microwave frequency range

Sörök dielektromos paramétereinek vizsgálata mikrohullám frekvenciatartományban

veszelov@mk.u-szeged.hu / valinagy@mk.u-szeged.hu

¹Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, tudományos munkatárs

²Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, főiskolai docens

Kivonat

A technológia és a tudomány folyamatos fejlődésének köszönhetően lehetővé válik az anyagok kémiai és fizikai tulajdonságainak minél teljesebb megismerése. Az élelmiszeripari termékek mérhető paramétereinek esetleges bővítése és folyamatos monitorozása hozzájárul a gyártás és minőségellenőrzés automatizálásához és nem utolsósorban a környezeti és vevői elvárásoknak is mind inkább meg lehet felelni a fenntarthatóság jegyében. A DAK-3.5 eszköz segítségével például az anyagok dielektromos viselkedése vizsgálható. Vizsgálandó anyagként folyadékot (vizes oldatot) választottunk: különböző alkoholtartalmú és gyártási technológiával készült dobozos sörök dielektromos paramétereit vizsgáltuk mikrohullám frekvenciatartományban (200–2400 MHz) különböző hőmérsékleteken (12 °C; 20 °C; 30 °C; 40 °C; 50 °C; 60 °C) és különböző „buborékhathatások” mellett (doboznyitás pillanatában, illetve 6 óra, 24 óra, 48 óra, 144 óra elteltével). Ugyanis a sör CO₂ tartalmának hatására a sörben buborékképződés és buborékáramlás, az érzékelő felületén pedig buborék akkumuláció figyelhető meg, amelynek következtében a vizsgált dielektromos paraméter (ϵ') a víz – mint referenciaszám – azonos frekvenciatartománybeli értékeitől eltérést mutat.

Az eredmények azt mutatják, hogy 24 óra eltelté után „buborékhathatás” már egyáltalán nincs egyetlen sörfajtánál sem, továbbá alacsonyabb hőmérsékleteken (12 °C; 20 °C) és <500 MHz frekvencia értékek esetében igen változó a dielektromos állandó. Az 500–2400 MHz frekvenciatartományban hasonló viselkedést mutatnak a vizsgált sörminták, e tartományban a hőmérséklet(változás) és a doboznyitás után eltelt idő hatásai markánsan megmutatkoznak.

Bevezetés

A különböző homogén elegyek (oldatok) közül a sör – mint vizes oldat – funkcionális „italnak” tekinthető: összetétele (B vitamin tartalma, ásványianyag tartalma, humulon és lupulon tartalma stb.) révén természetes emésztésjavító, vízajtó és nyugtató hatású tulajdonságokkal rendelkezik, CO₂ tartalma 0,2–0,4% [HTTP1]. Dielektromos tulajdonságainak vizsgálata kapcsán azonban nem elhanyagolandó szempont a CO₂ jelenléte, ugyanis az intenzív buborékképződés és áramlás befolyásolja a méréseket. Több kutató is végzett vizsgálatokat CO₂ technológiai segédanyaggal dúsított folyadékokkal (sör, cola), külön figyelmet szentelve a „buborékhathatás”-nak [Engelder & Buffler 1991; De Paepe 2015; Cuevas 2017; Gaspard et al. 2017; HTTP2].

Tekintettel arra, hogy a sör is és a cola is jelentős víztartalommal bíró folyadékok, ezért a víz dielektromos viselkedésének ismerete kulcsfontosságú. A statikus dielektromos permittivitás és a mikrohullámú abszorpció a Coulomb kölcsönhatásba lépő H₃O⁺ és OH⁻ ionok diffúziójából származik (nem annyira a H₂O molekulák orientációs mozgásából). A diffúzió sodródó komponense biztosítja a proton egyenáramú vezetőképességét. Kísérletek igazolják a különböző jelű ionok diffúziójának hatásait az egyenáramú vezetőképesség, a mikrohullámú abszorpció és a permittivitás vonatkozásában. Az ionok egyensúlya és állandó jelenléte (nagy

koncentrációban) a vízben már nem a H_2O véletlenszerű disszociációjának eredménye. A protoncsere, nevezetesen a $\text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ és $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^-$ „rovására” tartható fenn [Artemov et al. 2014].

A víz esetében a hőmérséklet növekedése ϵ' csökkenését okozza (egy adott frekvencián), ezért hasonló viselkedés várható a jelentős víztartalommal bíró anyagok esetében [Beszédes et al. 2016].

Kísérletek igazolják, hogy sörök esetében (adott állandó hőmérsékleteken) 0–5 GHz frekvenciatartományban csökkenő ϵ' értékeket regisztráltak, ~5–10 GHz frekvenciatartományban növekvő ϵ' értékeket figyeltek meg, majd a sugárzás frekvenciáját tovább növelve az ϵ' ismét csökkent. Itt megjegyzendő, hogy az alacsonyabb hőmérsékleti tartományban a dielektromos állandó csökkenésének tendenciája nagyobb volt, mint a magasabb hőmérsékleti tartományban. Továbbá a doboz kinyitása utáni habképződés hatása Smith diagrammal vizuálisan szemléltethető [Cuevas 2017]. Míg más kutatók cola-val végzett kísérleteik során azt tapasztalták, hogy az átmeneti növekedési tendencia az ϵ' vonatkozásában a ~15–20 GHz frekvenciatartományba tolódott el [Gaspard et al. 2017].

A fentiek alapján a kutatási célkitűzés a különböző alkoholtartalmú és gyártási technológiával készült dobozos sörök [Codex Alimentarius Hungaricus 2013] dielektromos viselkedésének vizsgálatával rávilágítani az idő és hőmérséklet(változás) együttes hatásaira, valamint kijelölni a stabil eredmények frekvenciatartományát.

Anyag és módszer, mérési folyamat

A folyadékok dielektromos viselkedésének tanulmányozása több évtizede a figyelem középpontjába került, a dielektromos paramétereinek számszerű ismerete segíti a folyadékok tulajdonságainak, összetételének megismerését. A különböző mérési elvek alapján működő eszközökkel és berendezésekkel mért dielektromos paraméterek [Göllei et al. 2009] információt nyújtanak azzal kapcsolatban, hogy a különböző anyagok elektromágneses térbe helyezése esetén a közölt energia mire fordítódik. Az elektromágneses hullámok egy része elnyelődik a folyadékban, más részük áthalad azon vagy visszaverődik annak felületéről. Itt megjegyzendő, hogy szükségessé válik a különféle folyadékminták mikrohullámú viselkedésének mérésére szolgáló, reflektometriai elven alapuló egyedi rendszerek elemzése is [Piuzzi et al. 2013]. A DAK-3.5 mérőrendszer [DAK Professional Handbook 2016] a folyadékok dielektromos paramétereinek meghatározásán túlmenően alkalmas a szilárd halmazállapotú és gél állagú anyagok vizsgálatára is. Mérési elve szerint a nyitott végű érzékelőt alkalmazó eljárások közé tartozik [Zhang et al. 2014]. Az érzékelőt – amely az anyag felületéről visszaverődő jeleket fogadja – folyadékok esetén bele kell meríteni abba. Mivel a vizsgált anyag dielektromos paramétereit az anyag felületéről visszavert jelek reflexiók tényezőjéből számítható ki, ezért a mérési pontosság érzékeny minden olyan körülményre, amely megváltoztatná azok fázisát, amplitúdóját vagy akár magukat a visszavert jeleket. Az érzékelő egy koaxiális kábelben keresztül közvetlenül csatlakozik a vektorhálózat analízátorhoz, így biztosítva a visszavert jelek stabilitását. A mérőrendszer alkalmas 200 MHz és 20 GHz közötti frekvencia tartományban történő mérésekre, és többféle anyagra gyári kalibrációval rendelkezik [Tereshchenko et al. 2011; DAK Professional Handbook 2016; HTTP3]. A vizsgált anyag folyadék – különböző alkoholtartalmú és gyártási technológiával készült dobozos sörök. Referencia anyagként a víz – mint a sörhöz legközelebb álló folyadék – szolgált.

Az 1. táblázatot tartalmazza a sörök fontosabb fizikai és kémiai jellemzőit.

1. táblázat Sörök minőségi jellemzői [Codex Alimentarius Hungaricus 2013; HTTP1 alapján]

Sörminták jele (fantázianév)	Szín* (EBC egység alapján)	Jelleg	Alkoholtartalom** / sör típusa
1. („alkoholmentes”)	világos	alsó erjesztésű (lager)	max. 0,5% (V/V) / alkoholmentes sör
2. („vörös sör”)	vörös	alsó erjesztésű (lager)	max. 0,5% (V/V) / alkoholmentes sör
3. („hidegkomlós”)	világos	alsó erjesztésű (lager)	4,5% (V/V) / sör

Sörminták jele (fantáziánév)	Szín* (EBC egység alapján)	Jelleg	Alkoholtartalom** / sör típusa
4. („félbarna hidegkomlós”)	félbarna	alsó erjesztésű (lager)	4,6% (V/V) / sör
5. („red ale”)	vörös	felső erjesztésű (ale)	4,8% (V/V) / sör
6. („pale ale”)	világos	felső erjesztésű (ale)	4,8% (V/V) / sör
7. („gold”)	világos	alsó erjesztésű (lager)	5,0% (V/V) / sör
8. („IPA”)	világos	felső erjesztésű (ale)	5,4% (V/V) / sör
9. („BAK”)	barna	alsó erjesztésű (lager)	7,3% (V/V) / sör

Megjegyzés: * világos: $<20 \pm 3$ EBC egység; félbarna, vörös: $20-45 \pm 6$ EBC egység; barna: $>45 \pm 15$ EBC egység

** alkoholmentes sör: $<0,5\%$ (V/V) alkoholtartalom; sör: $2,81-8,0\%$ (V/V) alkoholtartalom

A megbízható eredmények érdekében a mérés megkezdése előtt el kell végezni a kalibrálási folyamatot, továbbá minden mérés előtt/után meg kell tisztítani a mérőfejet. A mérések elvégzése a mikrohullám frekvenciatartományban (200–20000 MHz) adott hőmérsékleteken (12 °C; 20 °C; 30 °C; 40 °C; 50 °C; 60 °C) és időközönként (a sörösdobozok kinyitása után közvetlenül, majd 6 óra, 24 óra, 48 óra, 144 óra eltelte után) történt.

A mérések eredményeként az alábbiakban felsorolt abszolút és származtatott fizikai mennyiségek állnak rendelkezésre ahhoz, hogy következtetni lehessen az adott anyag (jelen esetben sör) összetételére, minőségi jellemzőire: ϵ^* – komplex dielektromos állandó (komplex permittivitás); ϵ' – komplex permittivitás valós része; ϵ'' – komplex permittivitás képzetes része; σ – vezetőképesség; $\text{tg}\delta$ – veszteségi tényező; Γ – reflexiós tényező.

A dielektromos jellemzőket álló közeg esetében (statikus mérések) vizsgáltuk. Egy-egy sörmintához tartozó mérési eredmény 10 mérési adat átlagaként adódik. A mérési eredmények grafikus ábrázolásakor ezeket használtuk.

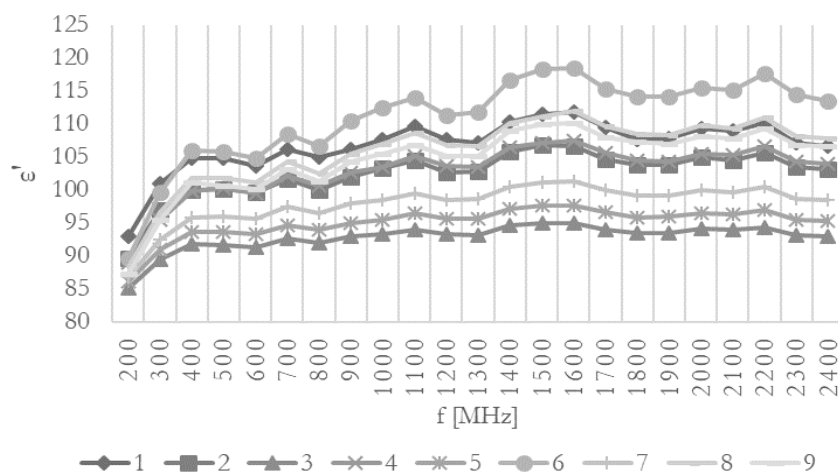
Eredmények

A dielektromos jellemzők közül – a terjedelmi korlátokra tekintettel – jelen közleményben a komplex permittivitás valós részének (ϵ') sörfajtánkénti frekvenciafüggését, illetve az idő és hőmérsékleti hatásokat mutatjuk be. Az 1. ábra e jellemző lefutását szemlélteti mind a kilenc vizsgált minta vonatkozásában.

200–400 MHz frekvenciatartományban közvetlenül doboznyitás után (12 °C hőmérsékleten) mindegyik sörfajtánál megfigyelhető egy meredek felfutási szakasz (a meredekség 3,26–8,18 között változik – legkisebb a 3., míg legnagyobb a 6. minta esetén).

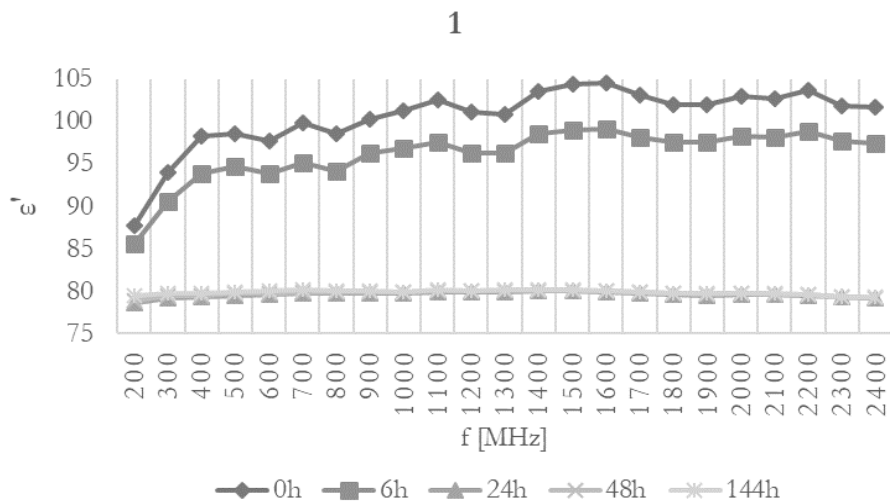
400–600 MHz frekvenciatartományban stagnálnak (illetve 1–2 %-kal csökkennek) az ϵ' értékek, majd 600–1100 MHz tartományban – hullámzóan ugyan –, de növekvő a tendencia.

A vizsgált mérési tartomány további részében (1100–2400 MHz) pedig az 1100 MHz frekvencián mérhető ϵ' értékek környezetében maradnak az értékek. Az ez utóbbi frekvenciatartományra jellemző átlagértékektől való eltérés $\pm 2,8-8,8\%$. A 2. sörminta nagyobb eltérései a fokozottabb habképződéssel magyarázhatók. (Itt megjegyzendő, hogy e jelenség a mérőberendezés grafikus kijelzőjén megjelenő Smith diagramon is nyomon követhető volt.)



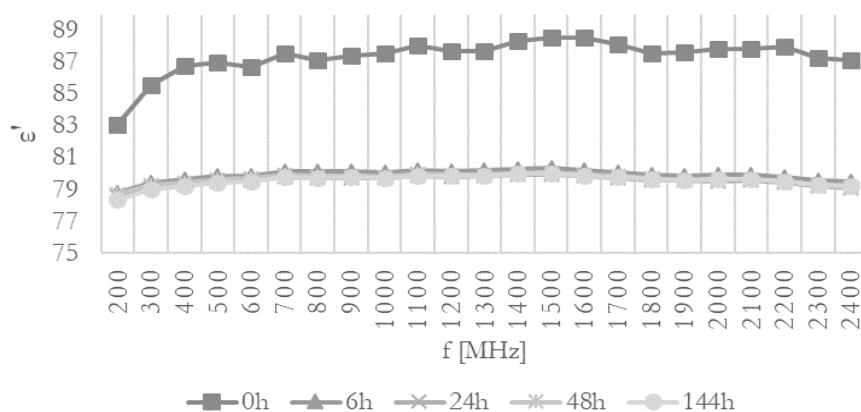
1. ábra Sörminták komplex permittivitásának valós rész (ϵ') 200–2400 MHz frekvenciatartományban 12 °C hőmérsékleten közvetlenül a doboz kinyitása után

A 2. ábra részabráái a teljesség igénye nélkül mutatják az egyes sörfajták komplex permittitásai valós részének (ϵ') értékeit. Általánosságban elmondható, hogy a doboznyitást követő 6, 24 óra elteltével már nem mutatkozik mérhető hatás. Viszont közvetlenül a doboznyitás pillanatától eltelt 6 óra (intenzív buborék- és habképződés időszaka) időtartamon belül célszerű és okszerű lenne további méréseket végezni. Az óránkénti mérések elvégzése kielégítőnek feltételezhető ezen időintervallumon belül, hiszen minden sörmintánál jól érzékelhető, hogy a doboznyitás pillanatától mért 24, 48 és 144 óra eltelte után már együtt futnak a görbék. Mivel a vizsgált folyadékmintáknál (sörmintáknál) meghatározó a víz jelenléte, ezért az értékeket tekintve a víz ϵ' értéke dominál. Az egyes sörmintákhoz tartozó részabrák alapján megállapítható továbbá, hogy maga a sörkészítés, a gyártási technológia (alsó/felsőerjesztés), az alkoholtartalom, illetve a technológiai segédanyagok szignifikánsan nem befolyásolják a vizsgált dielektromos paramétert.



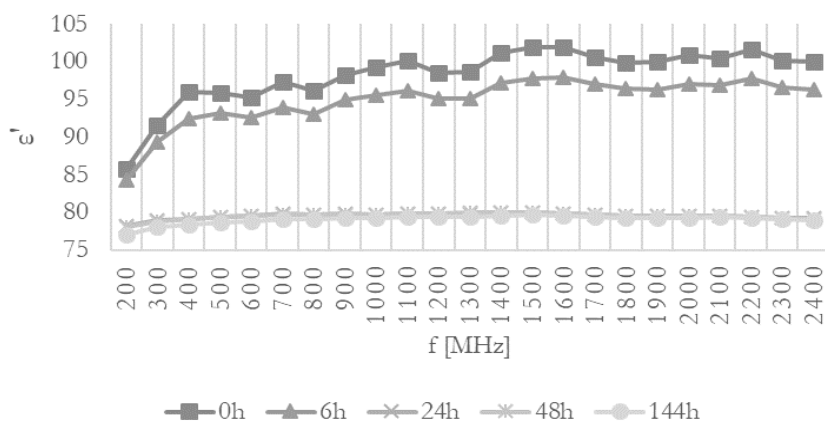
a) 1. sörminta

2



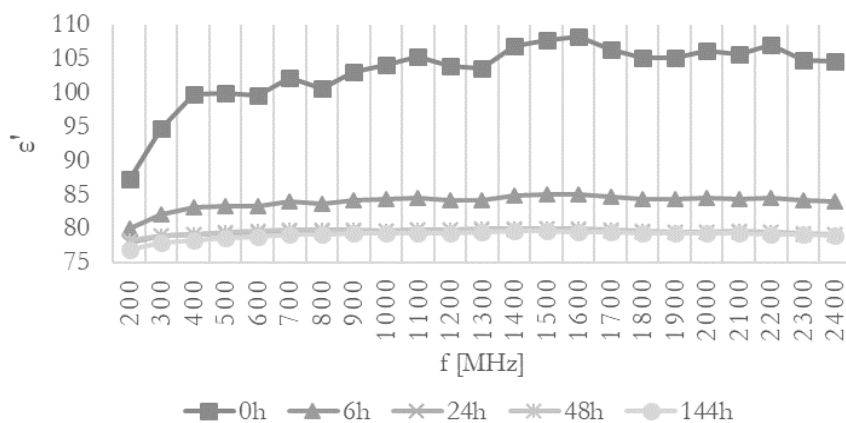
b) 2. sörminta

3



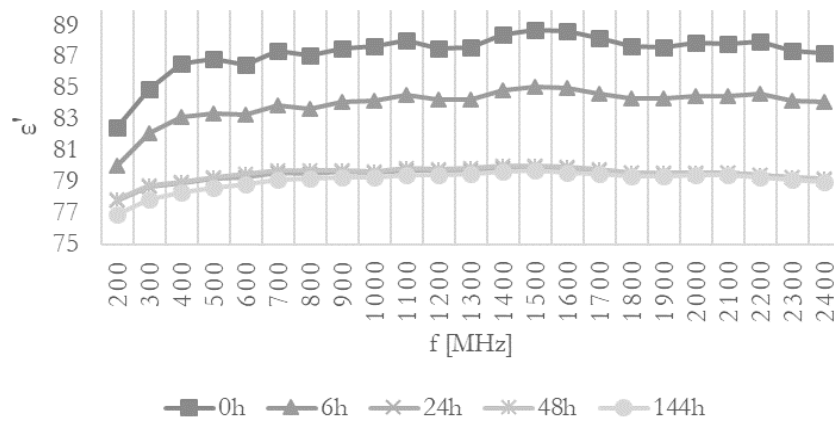
c) 3. sörminta

4



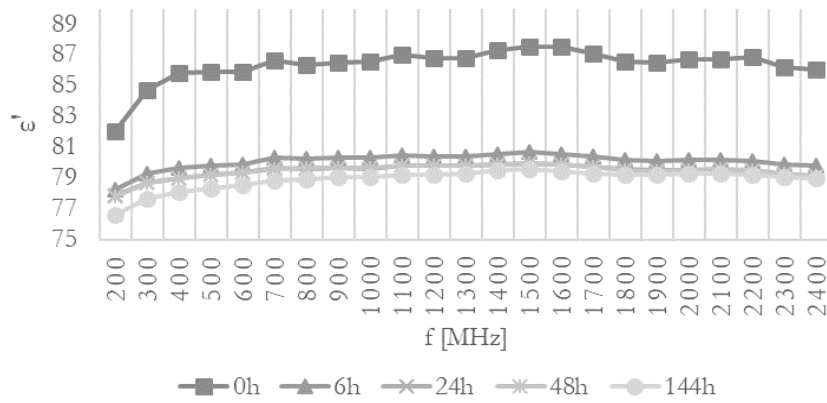
d) 4. sörminta

5



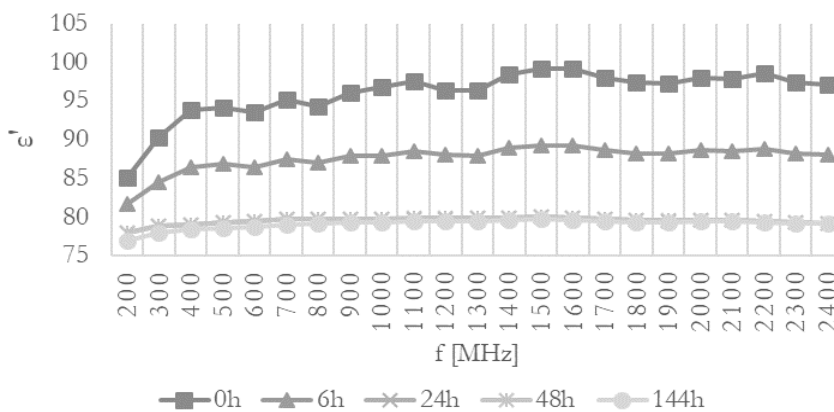
e) 5. sörminta

6

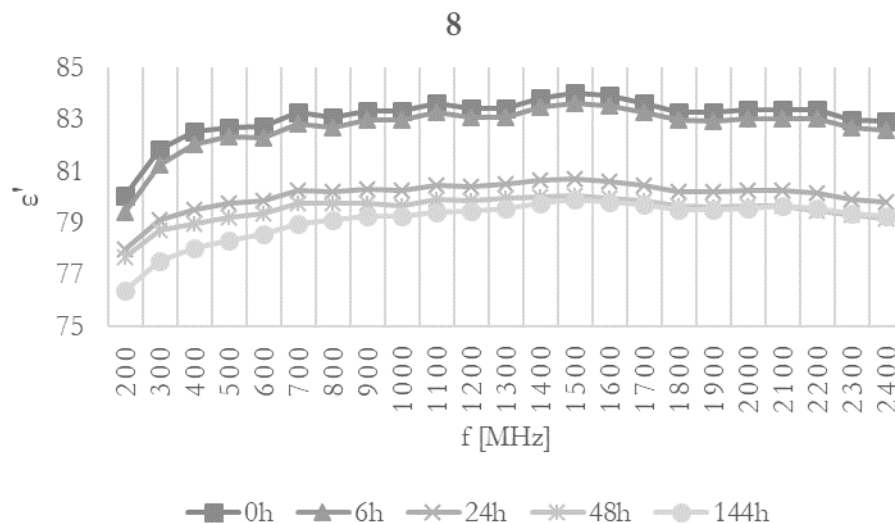


f) 6. sörminta

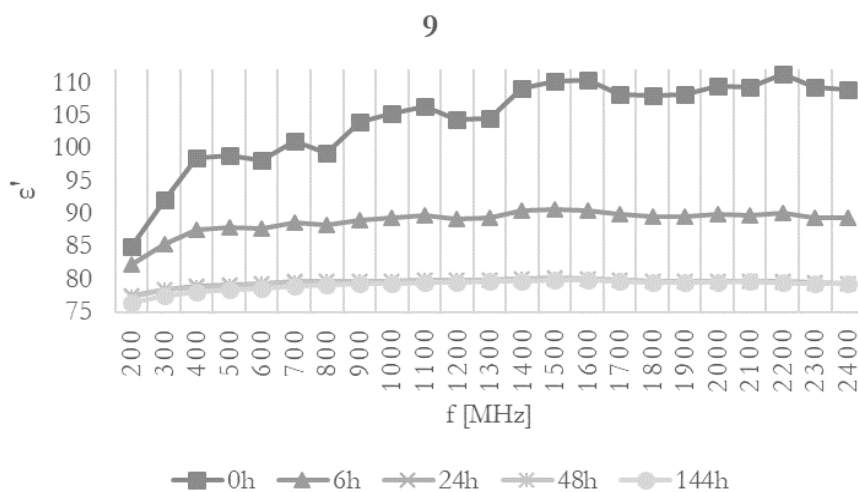
7



g) 7. sörminta



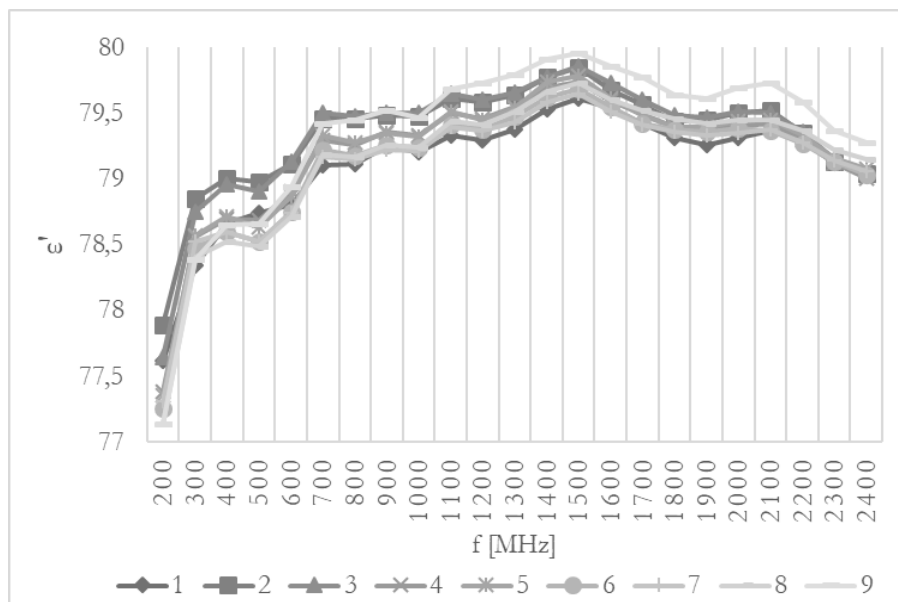
h) 8. sörminta



i) 9. sörminta

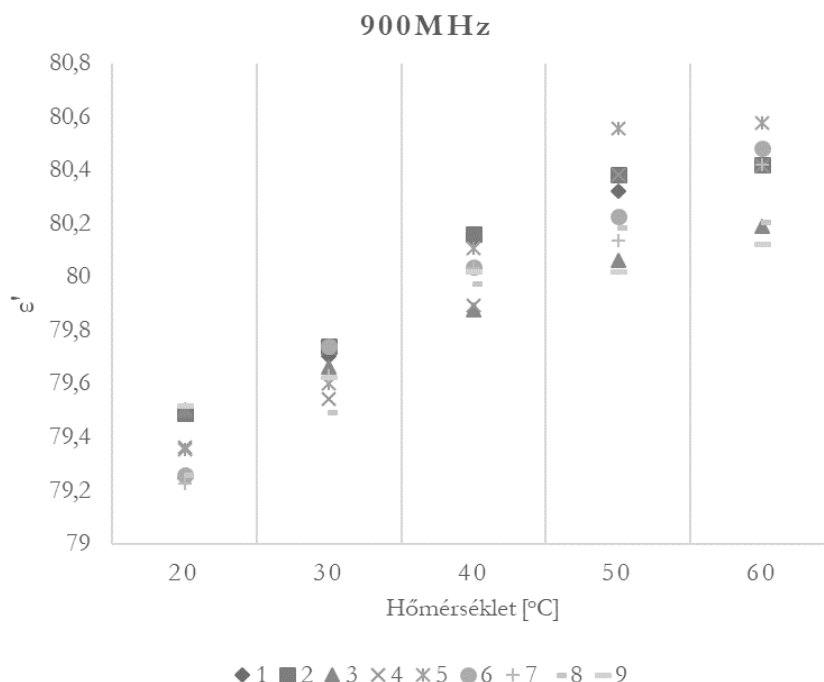
2. a)-i) ábra Sörminták komplex permittivitásának valós rész (ϵ') 200–2400 MHz frekvenciatartományban a doboz kinyitása után közvetlenül, 6h, 24h, 48h, 144h elteltével

A 3. ábra pedig azokat a mérési eredményeket mutatja, amelyek a dobozok kinyitása után eltelt 144 órával voltak regisztrálhatók. Néhány minta esetében már a „penészesedési” folyamatok is beindultak, azonban ennek láthatóan nem volt hatása a komplex permittitás valós részére (ϵ'). Mind a kilenc mintánál azonos lefutásúak a görbék, és közelítően együtt futnak. A már korábban is említett kezdeti felfutási szakaszt követően a 79,5 érték környezetében jegyezhetők.

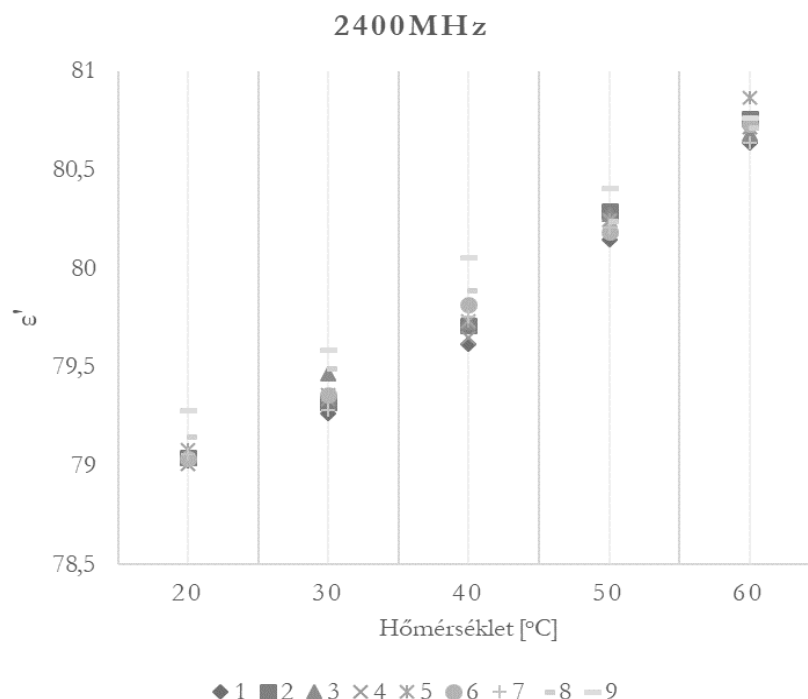


3. ábra Sörminták komplex permittivitásának valós rész (ϵ') 200–2400 MHz frekvenciatartományban 25 °C hőmérsékleten 144h elteltével a doboz kinyitása után

A 4. és 5. ábra fontos összefüggésre mutat rá, mégpedig, hogy egy adott frekvencián a különböző sörfajták hogyan viselkednek a hőmérsékletváltozás hatására. Ennek a mérésnek „csupán” az volt a célja, hogy tendenciózisan hogyan viselkednek a vizsgálatba bevont sörminták. Gyakorlatilag szignifikáns eltérés nem mutatkozott a hőmérsékletnövekedés hatására. Továbbá itt is megmutatkozik, hogy sem a gyártási technológia, sem pedig az alkoholtartalom nem bír befolyással a komplex permittitás valós részére, mint dielektromos jellemzőre. Azonban ezt a későbbiekben fontos és célszerű alaposabban is vizsgálni.



4. ábra Az egyes sörminták komplex permittitásának valós része (ϵ') 900 MHz frekvenciaértéken 20, 30, 40, 50, illetve 60 °C hőmérsékleten, 144 h elteltével a doboz kinyitása után



5. ábra Az egyes sörminták komplex permittivitásának valós része (ϵ') 2400 MHz frekvenciaértéken 20, 30, 40, 50, illetve 60 °C hőmérsékleten, 144 h elteltével a doboz kinyitása után

Megjegyzendő továbbá, hogy az általunk vizsgált egyes hőmérsékleti értékek között is célszerű lenne több hőmérsékleti értéken is méréseket végezni a tendencia pontosabb meghatározása végett, feltételezhetően 2 °C-os hőmérsékletlépcső már kielégítő lenne.

Következtetések, kitekintés

Az egyes sörfajták vizsgálati eredményei azt mutatják, hogy a komplex permittivitás valós részének (ϵ'), mint dielektromos jellemzőnek az értékei eltérően változnak mikrohullám frekvenciatartományban. Alacsonyabb hőmérsékleteken és <500 MHz frekvenciaértékek esetében „igen változó”. Az 500–2400 MHz frekvenciatartományban azonban hasonló viselkedést mutatnak a vizsgált sörminták. E tartományban a hőmérséklet(változás) és a doboznyitás után eltelt idő hatásai markánsan megmutatkoznak. Azonban a kezdeti felfutási szakaszt követően, tehát az 500–2400 MHz frekvenciatartományban érdemes a doboznyitást követően óránkénti vizsgálatokat végezni. Egy adott frekvenciához tartozóan pedig további hőmérsékletlépcsőket beiktatni a hőmérsékletfüggés pontosabb megmutatásához.

Felhasznált irodalmak

1. Artemov, V., Volkov, A. A., Pronin, A. V. (2014): Electrical properties of water: a new insight, Biophysics 59, pp. 520–523
2. Beszédes S., Kovács R., Keszthelyi-Sz. G., Hodúr C. (2016): Szennyvíziszapok biológiai lebonthatóságának és dielektromos jellemzőinek kapcsolata. LVIII. Georgikon Napok, Keszthely, pp. 45–52
3. Cuevas Solla, A. (2017): Study of electromagnetic properties of beers. Master's thesis, Universida de Vigo, Spain
4. Dielectric Assessment Kit (DAK) Professional Handbook V 2.4 (2016), Schmid & Partner Engineering AG, Zurich, Switzerland

5. De Paepe, T. (2015): Electromagnetic characterization of beer. TFM, Universida de Vigo, Spain
6. Engelder, D. S., Buffler, C. R. (1991): Measuring dielectric properties of food products at microwave frequencies. *Microwave World* 12, pp. 6–15
7. Gaspard, T., Cuevas, A., Cuiñas, I., Expósito, I., Verhaevert, J. (2017): Electromagnetic characterization of cola drinks. *Measurement* 107, pp. 111–119
8. Gölle, A., Vass, A., Pallai, E., Gerzson, M., Ludányi, L., Mink, J.: Apparatus and method to measure dielectric properties (ϵ' and ϵ'') of ionic liquids. *Review of Scientific Instruments* 80, 044703 (2009); <https://doi.org/10.1063/1.3117352>
9. Piuze, E., Merla, C., Cannazza, G., Zambotti, A., Apollonio, F., Cataldo, A., D'Atanasio, P., De Benedetto, E., Liberti, M.: A comparative analysis between customized and commercial systems for complex permittivity measurements on liquid samples at microwave frequencies, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* (2013)
10. Tereshchenko, O. V., Buesink, F. J. K., Leferink, F. B. J.: An overview of the techniques for measuring the dielectric properties of materials. General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, Turkey, (13–20 August 2011), p. 14
11. Zhang, K., Wu, T., Teng, J.: Testing dielectric properties of tissue-equivalent liquid using open-ended coaxial line technique based on the transverse electromagnetic model. 7th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), Dalian, 2014, pp. 498–503 (14-16 October 2014)
12. Codex Alimentarius Hungaricus – Directive 2-702_Beer (2013)
13. HTTP1: www.dreher.hu
14. HTTP2: https://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/224/349/RUG01-002224349_2015_0001_AC.pdf
15. HTTP3: www.microwaves101.com